

## 起爆方式对爆轰波传播特性的影响研究

郭建<sup>1</sup>, 孙博闻<sup>1</sup>, 姚颖康<sup>2</sup>, 王海亮<sup>3</sup>, 缪玉松<sup>1,\*</sup>, 张义平<sup>4</sup>

(1. 青岛理工大学 理学院, 青岛 266525; 2. 江汉大学 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056;

3. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 青岛 266590; 4. 贵州大学 矿业学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 为探究爆轰波碰撞对爆轰压力分布规律的影响, 采用理论推导、数值模拟和现场试验相结合的方法, 分析了不同起爆方式下炸药内部和外部爆轰压力的变化规律。研究结果表明: 爆轰波发生碰撞后, 依次产生正碰撞、斜碰撞及马赫反射现象, 最大爆轰压力可达到稳定爆轰压力的 3 倍以上; 采用对称双线性起爆方式时, 土体聚能侧所受爆轰压力是起爆侧的 2.74 倍, 轴向所受爆轰压力较单侧线性起爆方式提升了 75%。基坑爆破试验结果表明: 采用对称双线性起爆方式时, 沿爆轰波碰撞聚能方向呈一字型布置起爆, 炮孔间的贯通效果相较于单侧线性起爆方式得到了明显提升。

**关键词:** 聚能爆破; 爆轰波碰撞; 起爆方式; 数值模拟; 基坑爆破

**中图分类号:** TD235.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)03-0035-08

## Study of the effect of initiation method on the propagation characteristics of detonation wave

GUO Jian<sup>1</sup>, SUN Bowen<sup>1</sup>, YAO Yingkan<sup>2</sup>, WANG Hailiang<sup>3</sup>, MIAO Yusong<sup>1,\*</sup>, ZHANG Yiping<sup>4</sup>

(1. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China;

3. College Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao 266590, China; 4. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of detonation wave collision on the distribution of detonation pressure, a comprehensive approach combining theoretical derivation, numerical simulation and field experimentation was employed to analyze the changes in the internal and external detonation pressure of explosives under various detonation modes. The study findings reveal that following detonation wave collision, normal collision, oblique collision and Mach reflection phenomena occur sequentially, with the maximum detonation pressure being more than 3 times that of the stable detonation pressure. When employing the symmetrical bilinear detonation method, the detonation pressure on the energy side is 2.74 times that on the detonation side, and the axial detonation pressure increases by 75% compared to the single-side linear detonation method. Results from foundation pit blasting tests demonstrate that using the symmetrical bilinear detonation method leads to a straight-line arrange-

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879135; 52064004); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019BA023); 爆破工程湖北省重点实验室开放基金资助项目(BL2021-06)

作者简介: 郭建(1995—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人。硕士, 研究方向为工程爆破。E-mail: gj\_hsa@163.com。

\* 通信作者: 缪玉松(1986—), 男, 山西运城人。博士, 副教授, 主要从事爆炸力学和工程爆破研究。E-mail: miaoyusong@qut.edu.cn。

ment of detonations along the direction of detonation wave collision and energy collection, significantly enhancing penetration effects between blast holes compared to the unilateral linear detonation method.

**Key words:** cumulative blasting; detonation wave collision; initiation method; numerical simulation; pit blasting

钻爆法作为工程开挖的主要技术手段,在隧道掘进、矿山开采和市政工程等领域受到广泛应用<sup>[1]</sup>。随着爆破技术的发展和精细爆破理念的深入,如何提升炸药能量利用率逐渐成为爆破行业的技术难题。

国内外众多学者对聚能爆破进行了大量研究,赵建平<sup>[2]</sup>进行了不同聚能锥角的岩体损伤试验,得出聚能锥角为40°时,线性聚能爆破致裂岩体效果最佳。LENG等<sup>[3]</sup>从理论上推导出爆轰波碰撞存在聚能效应,并通过试验得到了验证。李晓杰<sup>[4]</sup>利用导爆索起爆工业炸药,爆轰波由聚能罩顶向下逐渐碰撞,实现线性聚能切割爆破。罗勇<sup>[5]</sup>利用药型罩的导能作用,使炮孔孔壁上受到的不均匀压力在预定的方向形成能量集中,实现聚能爆破。梁洪达<sup>[6]</sup>分析了不同聚能方式下的应力波传播规律,为岩石爆破提供有效的参考。方涛<sup>[7]</sup>对爆轰波叠加效应进行数值模拟分析,得出叠加后的爆轰压力与装药高度呈线性增长关系。余永强<sup>[8]</sup>提出了一种周边眼切缝聚能药包定向断裂控制技术,有效降低了对围岩体的损伤,增加了围岩的稳定性。YIN等<sup>[9]</sup>开展了一种双侧“V”型柱形药包的破岩机理研究,为聚能爆破提供一种新思路。周凯<sup>[10]</sup>开展了环向切缝管的掏槽爆破试验,并取得良好爆破效果,掏槽进尺和炮孔利用率均得到提升。综上所述,目前对于聚能爆破的研究主要聚焦在有/无聚能罩、切槽爆破、切缝爆破和爆轰波碰撞聚能等方面,现有方法在工程应用中常受到辅助工艺增加、炮孔利用率低和炮孔内水等因素的影响。因此,如何在不改变炮孔形式和使用外部聚能措施的前提下,实现药柱内爆轰波碰撞和爆轰压力传播规律的研究有待深入。

本文基于爆轰波碰撞聚能原理,采用理论推导、数值分析和现场试验相结合的方法,分析不同起爆形式下,基坑爆破后炸药内部和外部的爆轰压力变化规律,研究结果对提升炸药能量利用率,厘清爆轰波碰撞聚能机理具有一定的指导意义。

## 1 线性爆轰波碰撞聚能理论

对称双线性起爆方式(Symmetric Bilinear Initiation,简称SBI),是指利用炸药之间的爆速差(如高爆速导爆索起爆低爆速乳化炸药),改变爆轰波在炸药内部的传播规律,使爆轰波依次产生正碰撞、斜碰撞和马赫反射现象,实现爆轰波碰撞聚能<sup>[11]</sup>。根据质量、动量、能量守恒方程,Chapman-Jouguet(C-J)守恒条件和爆轰波反射定律可知,当爆轰波沿法向碰撞(正碰撞)时,爆轰压力 $P_1$ 与C-J爆轰压力 $P_H$ 的比值为<sup>[12]</sup>

$$\frac{P_1}{P_H} = \frac{5k + 1 + \sqrt{17k^2 + 2k + 1}}{4k} \quad (1)$$

式中: $k$ 为炸药多方指数,当 $k = 2.46$ (乳化炸药)时,爆轰波产生正碰撞的爆轰压力是C-J爆轰压力的2.31倍。

爆轰波反射定律指出,两强度相等且方向相反的爆轰波发生碰撞,可视为一条爆轰波对固壁的反射<sup>[13]</sup>。随着爆轰波的继续传播,爆轰波阵面与固壁的夹角逐渐增大,当夹角不超过临界值时,爆轰波以斜入射的方式发生反射(斜碰撞)。

根据质量、动量和能量守恒定律,可推导出入射角 $\varphi$ 与反射角 $\phi$ 存在如下关系<sup>[12]</sup>:

$$\frac{\tan\phi}{\tan[\phi + \arctan(\frac{\tan\varphi}{k \cdot \tan^2\varphi + k + 1})]} = \frac{k-1}{k+1} + \frac{2k^2}{k+1} \cdot \frac{1}{[k^2 + (k+1)^2 \cdot \cot\varphi] \cdot \sin[\varphi + \arctan(\frac{\tan\varphi}{k \cdot \tan^2\varphi + k + 1})]} \quad (2)$$

爆轰波产生斜碰撞时,爆轰压力  $P_2$  与 C-J 爆轰压力  $P_H$  的比值如下:

$$\frac{P_2}{P_H} = \frac{(k+1) \cdot \tan(\phi + \theta) - (k-1) \cdot \tan\phi}{(k+1) \cdot \tan\phi - (k-1) \cdot \tan(\phi + \theta)} \quad (3)$$

式中:  $\theta = \frac{\tan\phi}{k \cdot \tan^2\phi + k + 1}$  为偏转角, ( $^\circ$ )。

文献[14]提出,爆轰波发生斜碰撞后的爆轰压力是 C-J 爆轰压力  $P_H$  的 2.3~2.4 倍。

由爆轰波反射理论可知,随着爆轰波碰撞角度持续增大,入射角  $\phi$  超过  $46.2^\circ$ ,反射波将脱离固壁<sup>[13]</sup>,爆轰波在碰撞中线附近产生马赫反射现象。此时,爆轰压力  $P_3$  与 C-J 爆轰压力  $P_H$  的比例关系如下:

$$\frac{P_3}{P_H} = \frac{1}{\sin^2\phi} + \frac{1}{\sin\phi} \cdot \left(\frac{1}{\sin^2\phi} - 1\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{1 - \cos\phi} \quad (4)$$

根据式(4)绘制  $P_3/P_H$  与入射角  $\phi$  的关系曲线,如图 1 所示。当爆轰波碰撞达到马赫反射时,爆轰压力急速增长至 C-J 爆轰压力的 3 倍以上。爆轰压力比值随着入射角度的增加而减小,最终衰减至稳定爆轰压力。理论上,对称双线性起爆方式可以改变炸药内部爆轰波传播规律,达到爆轰波碰撞聚能的目的。

## 2 数值模型

### 2.1 模型建立

图 2 为单孔爆破数值模型示意,主要材料为炸药、空气和土壤。其中,炸药起爆方式分为对称双线性起爆(SBI)和单侧线性起爆(Unilateral Linear Initiation,简称 ULI)。WANG 等<sup>[15]</sup>探索了爆炸模拟中耦合介质的合理尺寸,认为当耦合半径大于 10 倍爆炸半径时,数值计算结果是收敛的。因此,空气域直径设置为 320 mm,土壤和炸药直径为 400 和 32 mm,模型整体高度为 100 mm。为有效节约计算时间,根据对称性原理,建立 1/2 模型,模型顶面设置为自由边界,四周设置为无反射边界用于模拟无限土介质,对称面设置为对称边界。此外,计算时采用流固耦合算法,可有效避免网格畸变过大造成的计算发散、计算结果不可信等问题<sup>[16]</sup>。

### 2.2 材料参数

Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程是一种高能燃烧模型,能够预测爆炸的大压力范围,在数值模拟中得到广泛应用<sup>[17]</sup>。炸药爆炸是瞬时过程,为精确模拟炸药起爆后爆轰波传播过程,本文采用高能炸药材料模型(\*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN)及(\*EOS\_JWL)状态方程控制炸药爆轰过程,其表达式如下:

$$P = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 V} + \frac{\omega \cdot E}{V} \quad (5)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为常数;  $P$  为爆轰产物的爆轰压力,  $10^2$  GPa;  $V$  为炸药相对体积,  $\text{cm}^3$ ;  $E$  为炸药内能, J。

JWL 状态方程参数选自文献[18],如表 1 所示。

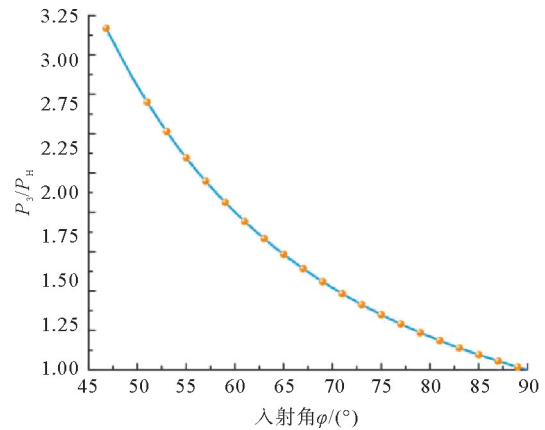


图 1 马赫反射爆轰压力增长比

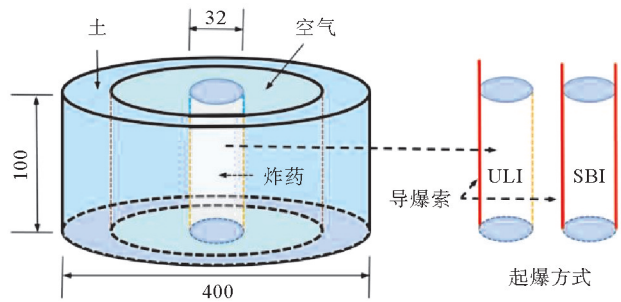


图 2 计算模型示意(单位:mm)

表1 炸药参数

炸药类型	密度 $\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	爆速 $D/$ ( $\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ )	$A/(10^2 \text{ GPa})$	$B/(10^2 \text{ GPa})$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E/\text{GPa}$
导爆索	1.260	0.654	5.731	0.202	6.00	1.80	0.28	0.09
乳化炸药	1.140	0.478	3.264	0.058	5.80	1.56	0.57	0.027

土壤材料模型选用 \* MAT\_SOIL\_AND\_FOAM 数值模型,土壤主要参数取自文献[19],分别为:土壤密度  $\rho_0 = 1.70 \text{ g/cm}^3$ ,动剪切模量  $G_s = 0.03 \text{ GPa}$  和体积模量  $K_s = 0.065 \text{ GPa}$ 。空气域采用 \* MAT\_NULL 模型和线性多项式状态方程 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 进行描述,密度  $\rho_a = 0.0012 \text{ g/cm}^3$ ,单位体积内能  $E_a = 0.25 \text{ MPa}$ 。

### 3 结果分析

图3为不同起爆方式(ULI和SBI)二维平面爆轰波传播过程。从图3(a)可以看出,采用ULI方式时,爆轰波由起爆点逐步往对侧传播,爆轰波阵面为弧形波阵面。采用SBI方式时,爆轰波由药包两侧向中心传播,传播至药包中心线处发生碰撞,随着爆轰波持续传播,爆轰波在非起爆侧形成局部能量集中,如图3(b)所示。

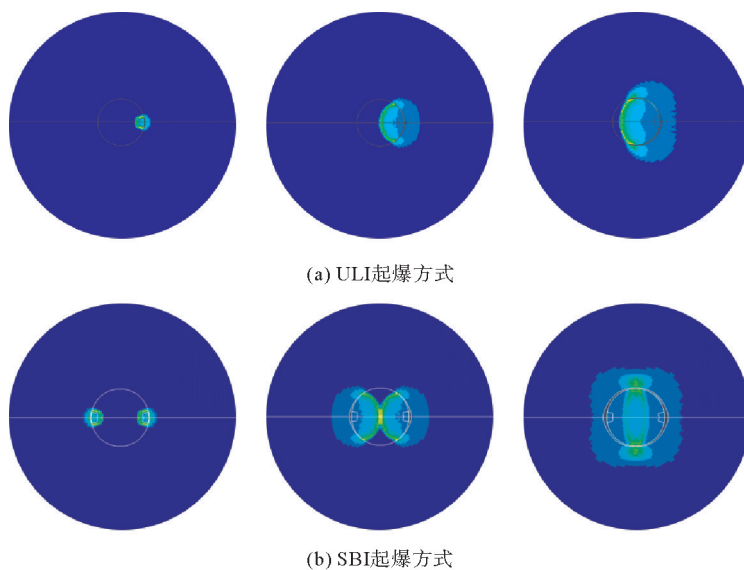


图3 不同起爆方式爆轰波传播过程

为研究对称双线性起爆方式对爆轰压力分布规律的影响。首先,对炸药内部爆轰压力分布规律进行分析,如图4所示。 $t = 0.6 \mu\text{s}$ 时条形药包被对称布置的导爆索起爆, $t = 3.2 \mu\text{s}$ 时爆轰波在药包中心线处发生碰撞,此时的碰撞角度理论上为  $0^\circ$ ,称为爆轰波的正碰撞。随着爆轰波碰撞角度的增大,爆轰波开始以斜入射的方式发生反射。 $t = 5.1 \mu\text{s}$ 时爆轰波碰撞达到马赫反射条件,爆轰压力急剧增加,在条形药包非起爆侧形成了局部聚能效果。

为确定爆轰波碰撞所产生的压力变化关系,在药性二维平面提取稳定爆轰压力  $P_0$ ,正碰撞时的爆轰压力  $P_1$  和马赫爆轰压力  $P_3$ ,如图5所示。从图5中可以看出,炸药稳定爆轰时的压力为  $4.16 \text{ GPa}$ 。相较于稳定爆轰压力,正碰撞时的爆轰压力明显提升,可达到  $6.60 \text{ GPa}$ 。随着爆轰波持续传播, $t = 5.1 \mu\text{s}$ 时最大爆轰压力值可达到  $9.61 \text{ GPa}$ ,远大于稳定爆轰压力值。数值模拟结果表明:采用对称双线性起爆方式,可以改变爆轰波传播规律,利用爆轰波碰撞实现聚能的目的。

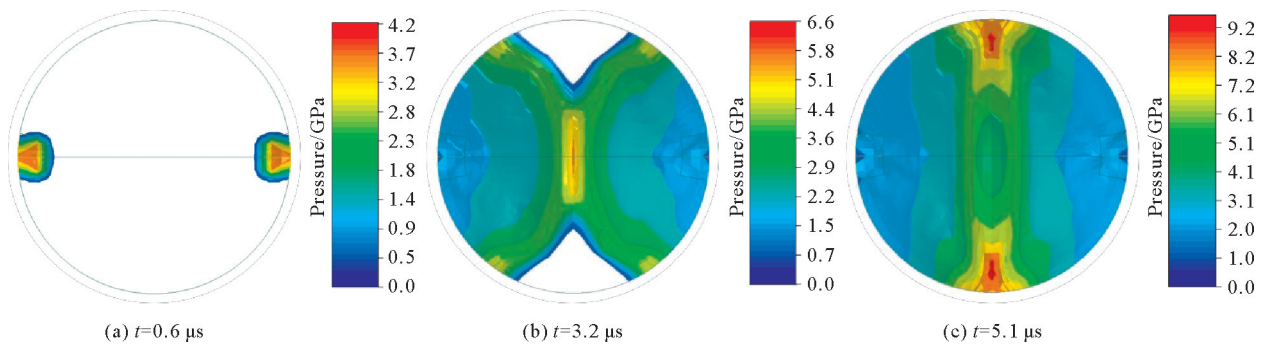


图 4 炸药内部爆轰压力分布规律

图 6 展示了炸药外部水平和纵向压力监测点的布置形式。其中,水平方向分为聚能侧监测点和起爆侧监测点,监测点距离炮孔中心的距离分别为 15、45、65 mm。纵向监测点位于药包聚能方向,间距为 25 mm。

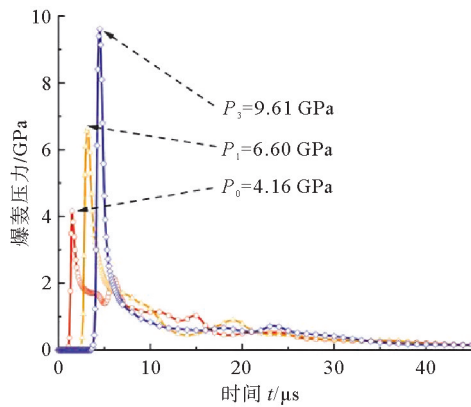


图 5 爆轰压力增长曲线

— 稳定爆轰 $P_0$ ; - - 正碰撞 $P_1$ ; — 马赫反射 $P_3$

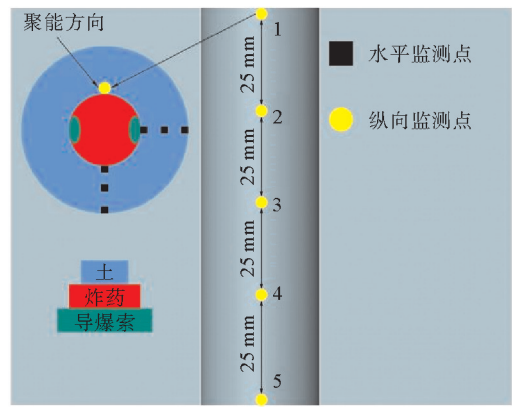


图 6 模型监测点

提取图 6 中水平监测点压力峰值,并绘制压力峰值曲线(图 7)。从图 7 可以看出,不同起爆方式的水平爆轰压力均随着与炮孔中心距离的增加呈线性递减的趋势。采用 SBI 方式时,位于起爆侧所受的爆轰压力与 ULI 方式对比无明显提升,最大爆轰压力为 3.22 GPa。同时,位于聚能侧顶部所受的最大爆轰压力可达到 8.83 GPa,是起爆侧的 2.74 倍。

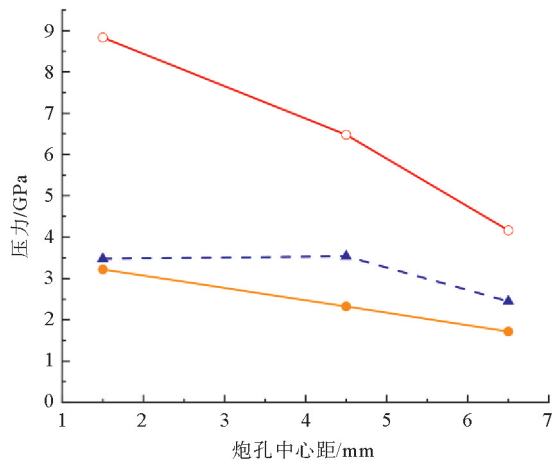


图 7 不同起爆方式水平压力曲线

—○— SBI聚能侧; —●— SBI非聚能侧; -▲- ULI

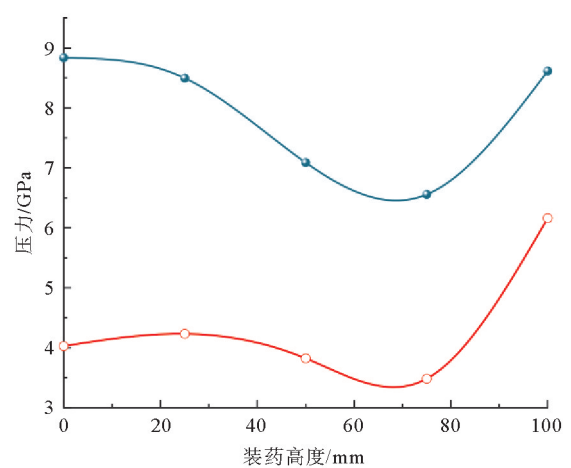


图 8 不同起爆方式轴向压力曲线

—●— SBI; —○— ULI

图8展示了不同起爆方式下轴向压力分布规律。随着装药高度的增加,压力曲线呈现先增大后减小再增大的趋势。采用SBI方式,处于不同装药高度的压力明显高于ULI方式,平均压力值较ULI方式提升75%。

综上所述,采用对称双线性起爆方式,可以改变炸药内部爆轰波传播规律。通过爆轰波之间的碰撞效应,实现聚能爆轰的目的。聚能侧所受的爆轰压力是起爆侧的2.74倍。SBI方式底部所受的爆轰压力可达到8.61 GPa,相较于ULI方式可提升28%。

## 4 现场试验

### 4.1 试验方案

为验证对称双线性起爆技术的聚能效果,在青岛市某水库进行现场试验,该地区场地开阔、地形平坦,土壤主要以粉质黏土为主。本次试验采用单导爆索线性起爆和对称双线性起爆两种方式,炮孔深度1.8 m,炮孔直径45 mm,单孔装药量为1.5 kg。采用电子雷管起爆导爆索,爆破网路最大起爆孔数12个,爆破最大药量为18 kg。其中,对称双线性起爆方式的聚能侧采用一字型布孔,炮孔间距为100 cm,如图9(a)所示。两种起爆方式间距为8 m,采用连续装药结构(图9(b)),条形药包为直径32 mm的乳化炸药,装药高度为150 cm,填塞长度20 cm。爆破试验参数如表2所示。

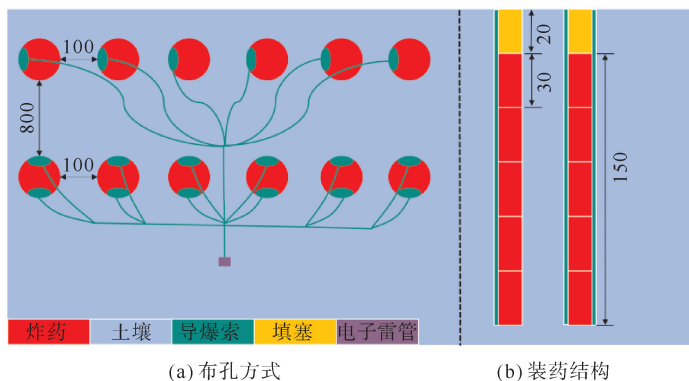


图9 爆破设计方案(单位:cm)

表2 爆破试验参数

起爆方式	炮孔间距/m	炮孔直径/mm	装药高度/m	填塞长度/cm	炮孔个数/个	导爆索长度/m	单孔装药量/kg
单侧线性起爆	1	45	1.5	20	6	18.6	1.5
对称双线性起爆	1	45	1.5	20	6	31.2	1.5

图10展示了采用对称双线性起爆方式时聚能药包的绑扎过程,对于乳化炸药或其他带有外包装的炸药,可通过扎带固定导爆索的对称布置实现爆轰波之间的碰撞达到聚能的目的。此外,针对深孔爆破中对称双线性起爆方式操作装药难度大的问题,提出了放置对称式导爆索起爆药柱的炮棍装置<sup>[20]</sup>和双导爆索对称起爆炸药连续生产装置<sup>[21]</sup>,用于解决采用对称双线性起爆方式时中深孔爆破装药精度的问题,从而克服现有的技术不足,提高装药效率,节约作业时间。



图10 炸药绑扎过程

## 4.2 试验结果分析

从最终的爆破效果可以看出,两种起爆方式均产生尺寸约为 $6\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的基坑,并且在基坑中线处留有6个柱形空腔,如图11所示。采用单侧导爆索线性起爆方式下的柱形空腔之间留有 $0.3\sim 0.5\text{ m}$ 的土墙,未达到预期爆破贯穿效果(图11(a))。当采用对称双线性起爆方式时,利用爆轰波碰撞产生的聚能效应,炮孔之间达到了较好的贯通效果(图11(b))。

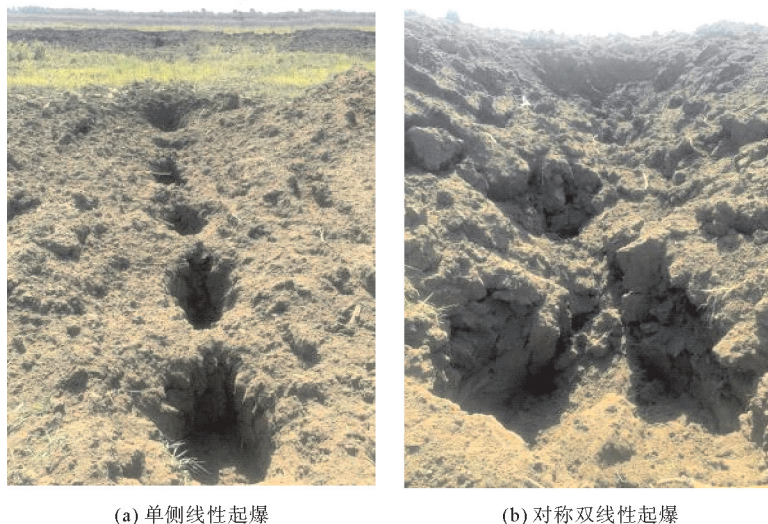


图11 不同起爆方式爆后基坑

## 5 结论

1) 基于爆轰波碰撞理论,分析了爆轰压力与入射角度的关系,理论计算结果表明:爆轰波产生正碰撞时,爆轰压力随炸药多方指数的增大而减小;随着入射角度的增大,爆轰波碰撞达到马赫反射条件,爆轰压力可达到C-J爆轰压力的3倍以上。

2) 通过建立三维单孔基坑爆破模型,分析了二维平面和轴向爆轰压力分布规律,数值模拟结果表明:采用对称双线性起爆方式,可以改变炸药内部爆轰波分布规律,实现爆轰波碰撞聚能的目的;在二维平面,爆轰波碰撞聚能侧的爆轰压力是起爆侧的2.74倍;SBI聚能侧轴向所受爆轰压力较ULI方式提升了75%;底部所受的爆轰压力可达到8.61 GPa,相较于ULI方式可提升28%。

3) 为进一步探究对称双线性起爆方式的聚能效应,通过开展土体基坑爆破试验进行验证,试验结果表明:采用对称双线性起爆方式时,将炸药聚能方向一字型布置,爆后效果相较于单侧线性起爆方式可以达到较好的贯通效果。从而得出,对称双线性起爆技术在提升炸药能量利用率方面存在较好的应用前景,但在试验过程中爆后基坑出现部分回填,导致回填土以下区域贯通效果有待考证。

### 参考文献(References):

- [1] 郭德勇,张超,朱同功,等. 地应力对煤层深孔聚能爆破致裂增透的作用[J]. 工程科学学报,2022,44(11):1832-1843.  
GUO Deyong,ZHANG Chao,ZHU Tonggong,et al. Effect of in-situ stress on the cracking and permeability enhancement in coal seams by deep-hole cumulative blasting[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(11):1832-1843.
- [2] 赵建平,卢伟,程贝贝,等. 聚能锥角对线性聚能爆破致裂岩体效果的影响[J]. 工程爆破,2021,27(5):72-79.  
ZHAO Jianping,LU Wei,CHEN Beibei,et al. Effect of the shaped cone angle on fracturing rock in the linear shapedcharge blasting[J]. Engineering Blasting,2021,27(5):72-79.
- [3] LENG Z D,SUN J S,LU W B,et al. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation[J]. Computers and Geotechnics,2021,129:103873.
- [4] 李晓杰,闫鸿浩,王小红,等. 线型聚能切割爆破的理论研究[J]. 工程爆破,2021,27(1):1-13.  
LI Xiaojie,YAN Honghao,WANG Xiaohong,et al. Theory study on linear shaped charge cutting blasting[J]. Engineering Blasting,

- 2021,27(1):1-13.
- [5] 罗勇,沈兆武. 聚能爆破在岩石控制爆破中的研究[J]. 工程爆破,2005,11(3):13-17.  
LUO Yong,SHEN Zhaowu. Study on cumulative explosion of controlled blasting of rock mass[J]. Engineering Blasting,2005,11(3):13-17.
- [6] 梁洪达,郭鹏飞,孙鼎杰,等. 不同聚能爆破模式应力波传播及裂纹扩展规律研究[J]. 振动与冲击,2020,39(4):157-164.  
LIANG Hongda,GUO Pengfei,SUN Dingjie, et al. A study on crack propagation and stress wave propagation in different blasting modes of shaped energy blasting[J]. Journal of Vibration and Shock,2020,39(4):157-164.
- [7] 方涛,梁民族,李翔宇. 爆轰波叠加作用下金属杆条断裂行为分析[J]. 火炸药学报,2020,43(3):303-307.  
FANG Tao,LIANG Minzu,LI Xiangyu. Analysis of rod-fracture behavior under the effects of detonation wave interaction[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2020,43(3):303-307.
- [8] 余永强,余雳伟,范利丹,等. 定向断裂控制爆破技术在巷道掘进中应用研究[J]. 爆破,2022,39(1):61-67.  
YU Yongqiang,YU Liwei,FAN Lidan, et al. Application study of directional fracture controlled blasting technology in roadway excavation[J]. Blasting,2022,39(1):61-67.
- [9] YIN Y,SUN Q,ZOU B Q, et al. Numerical study on an innovative shaped charge approach of rock blasting and the timing sequence effect in microsecond magnitude[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2021,54(9):4523-4542.
- [10] 周凯,赵新琛,崔步云,等. 环向切缝聚能管在隧道掘进中的试验研究[J]. 工程爆破,2021,27(5):26-31.  
ZHOU Kai,ZHAO Xincheng,CUI Buyun, et al. Experimental study on of circular slit shaped tube in tunnel excavation[J]. Engineering Blasting,2021,27(5):26-31.
- [11] 缪玉松,郭建,陈翔,等. 矿用条形药包轴向爆轰波碰撞聚能特性研究[J]. 金属矿山,2022(7):113-119.  
MIAO Yusong,GUO Jian,CHEN Xiang, et al. Study on propagation characteristics of axial detonation wave of mining linear charges[J]. Metal Mine,2022(7):113-119.
- [12] MIAO Y S,LI X J,YAN H H, et al. Research and application of a symmetric bilinear initiation system in rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,102:52-56.
- [13] 缪玉松,李晓杰,王小红,等. 爆轰波碰撞的聚能效应[J]. 爆炸与冲击,2017,37(3):544-548.  
MIAO Yusong,LI Xiaojie,WANG Xiaohong, et al. Munroe effect of detonation wave collision[J]. Explosion and Shock Waves,2017,37(3):544-548.
- [14] 韦祥光. 爆轰波聚能爆破的技术基础研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.  
WEI Xiangguang. Techniqc basis research on the asscmblingenergy blasting of detonation waves[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2012.
- [15] WANG Z L,WANG H C,WANG J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. Computers and Geotechnics,2021,135:104172.
- [16] 胡涛,李祥龙,关思,等. 分段装药结构爆破效果的数值模拟研究[J]. 中国工程科学,2014,16(11):36-41.  
HU Tao,LI Xianglong,GUAN Si, et al. Numerical simulation of structure performance under blasting with piecewise charge[J]. Engineering Science,2014,16(11):36-41.
- [17] 吴超,周传波,路世伟,等. 柱状装药不同起爆方式的数值模拟研究[J]. 爆破,2016,33(2):74-77.  
WU Chao,ZHUO Chuanbo,LU Shiwei, et al. Numerical simulation on cylindrical charged explosives with different initiation[J]. Blasting,2016,33(2):74-77.
- [18] MIAO Y S,LI X J,KONG L, et al. Study on the symmetric bilinear initiating technique of deep-hole boulder blasting in the TBM tunnel excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021(5):103871.
- [19] 魏连雨,李海超,刘艳竹,等. 条形药包爆炸挤密黄土路堤横向影响规律[J]. 爆炸与冲击,2018,38(1):233-240.  
WEI Lianyu,LI Haichao,LIU Yanzhu, et al. Lateral influence rules on explosion-compacted loess embankment by linear explosive bars[J]. Explosion and Shock Waves,2018,38(1):233-240.
- [20] 缪玉松,郭建,陈凡秀,等. 一种用于放置对称式导爆索起爆药柱的炮棍装置及方法:CN114858023A[P]. 2022-08-05.  
MIAO Yusong,GUO Jian,CHEN Fanxiu, et al. A device and method for placing symmetrical detonating cord initiation charges; CN114858023A[P]. 2022-08-05.
- [21] 缪玉松,郭建,董友雯,等. 一种双导爆索对称起爆炸药连续生产装置:CN112902722B[P]. 2022-07-26.  
MIAO Yusong,GUO Jian,DONG Youwen, et al. A continuous production device for dual detonating cord symmetrical initiation explosives; CN112902722B[P]. 2022-07-26.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)